

# 기기 충격시험 결과를 활용한 Rayleigh 감쇠 계수 산출

## Calculation of Rayleigh Damping Coefficient using Shock Test Results

구 정 모<sup>†</sup>  
Jeong-Mo Ku<sup>†</sup>

(Received November 25, 2025 ; Revised December 23, 2025 ; Accepted December 24, 2025)

**Key Words :** Rayleigh Damping(레이레이 감쇠), Shock Analysis(충격 해석), Complex Exponential Method(복소 지수법)

### ABSTRACT

To improve analysis efficiency in analyzing large structures, we divided certain equipment into sub-assemblies and analyzed them. Problems arose during the time-domain shock analysis of the transmitted shock load. To address this problem, we considered the application of a damping coefficient, and thus studied methods for estimating appropriate damping coefficients. We simulated shock loads on the target device, performed shock tests, and acquired data. We calculated modal parameters of the shock signal using the complex exponential method. Based on these results, we derived the Rayleigh damping coefficients.

### 1. 서 론

합정의 생존성 확보를 위해 합정에 탑재되는 주요 장비들은 적의 공격에 의한 비접촉성 수중폭발에 피격 되었을 때 최소한의 내충격 건전성을 확보할 것을 요구 한다. 일반적으로 충격 건전성을 확인하기 위해 시험이 가능한 경우 시험을 우선적으로 고려하지만, 시험이 어려운 경우 해석을 통해 내충격성을 확인한다<sup>(1-4)</sup>. 대형 장비의 경우 국내에서 시험할 수 있는 곳이 없기 때문에 해석을 통한 내충격성 확인을 수행한다<sup>(5)</sup>.

대형 구조물을 해석하는데 있어 부분품의 크기 차이가 많이 나는 전체 구조물을 한꺼번에 해석하려면 요소수가 과도하게 많아져 해석 시간이 크게 증가하기 때문에, 전체 구조물을 부분품으로 나누고 전달되는 충격하중을 계산하여 부분품에 인가하는 방법으로 해석을 수행한다<sup>(6)</sup>.

이 과정에서 각 부분품으로 전달되는 충격 입력은 충격 시간신호를 입력으로 하거나 충격 시간신호의 SRS를 계산하고 이를 만족하는 시간 신호를 생성하여 입력을 주는 등의 방법으로 세부 구조물의 해석을 수행한다. 이 때, 부분품으로 전달되는 충격 시간 신호를 입력으로 사용하는 경우 일반적으로는 장비 내 충격 해석을 수행함에 있어 감쇠를 적용하지 않기 때문에 짧은 시간 내에 끝나는 수중폭발 충격입력과 달리 긴 충격 입력 신호가 부분품에 적용되며, 이로 인해 실제 물리적으로 발생할 수 있는 응답보다 큰 응답이 나타날 수 있다<sup>(7)</sup>.

감쇠를 적용하게 되면 위와 같은 문제를 해결할 수 있는지에 대해 검토하기 위해 충격 해석에 감쇠 적용 방안을 검토하였다. 합정 탑재 장비의 경우 소음 및 장비로 전달되는 충격을 저감하기 위해 장비 하부에 마운트를 적용한다. 이 때 비선형 마운트를 사용하게 되면 시간 영역 해석을 수행해야 한다.

<sup>†</sup> Corresponding Author ; Member, Agency for Defense Development, Senior Researcher  
E-mail : ustaryou@naver.com

<sup>‡</sup> Recommended by Editor Yunsang Kwak  
© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

이를 위해 적절한 시간 영역 감쇠를 도출하는 방법을 탐색했다. 참고문헌에서는 선체 수중폭발시험에서 획득한 선체 응답을 바탕으로 모달 특성을 분석했고<sup>(8-10)</sup>, 이를 바탕으로 Rayleigh 감쇠 계수를 도출하였다. 해당 방법을 구조물에 적용하여 감쇠 계수를 계산하기 위해 대상 장비에 대한 충격시험을 수행하고 신호를 계측하였다.

국내에서는 대형 구조물의 수중폭발 충격시험이 제한되므로, 대형 충격시험기에서 이 구조물을 모사한 인터페이스 구조물을 설치하고 부분품으로 전달되는 충격하중을 계측하였다. 복소지수법을 이용해 계측한 시간 신호의 모드 기여도 및 감쇠 계수를 계산하였고, 감쇠 계수를 만족시키는 Rayleigh 감쇠 계수를 산출한 결과를 제시하였다.

2. 복소지수법을 이용한 모달 특성 추정

일반적인 다자유도 점성 감쇠 시스템에서 이너턴스  $A(\omega)$ 는 식 (1)과 같다.

$$A(\omega) = \sum_{r=1}^N \frac{A_r}{j\omega - S_r} + \frac{A_r^*}{j\omega - S_r^*} \tag{1}$$

이때, 복소고유치  $S_r = -\omega_r \zeta_r + j\omega_r \sqrt{1 - \zeta_r^2}$  이고  $\omega_r$  은  $r$ 차 모달 고유진동수,  $\zeta_r$ 은  $r$ 차 모달 감쇠이다.  $j$ 는 복소수,  $A_r$ 은  $r$ 차 모드 기여도,  $\omega$ 는 진동수,  $N$ 은 시스템 자유도이고 상첨자 \*은 켈레 복소수이다.

식 (1)은 식 (2)와 같이 표현 가능하며, 식 (2)를 역푸리에 변환하게 되면 식 (3)과 같다.

$$A(\omega) = \sum_{r=1}^{2N} \frac{A_r}{j\omega - S_r}, \tag{2}$$

$$A_r \Rightarrow A_r^*, S_r \Rightarrow S_r^* \text{ for } r > N$$

$$h(t) = \sum_{r=1}^{2N} A_r e^{S_r t} \tag{3}$$

등시간간격  $\Delta t$ 로 샘플링 된 길이  $L+1$ 짜리 impulse response function  $h(t)$ 는 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} \{h\}^T &= \{h_0, h_1, h_2, \dots, h_L\} \\ &= \{h(0), h(\Delta t), \dots, h(L\Delta t)\} \end{aligned} \tag{4}$$

식 (4)의 각 항을 식 (3)에 대입하면 식 (5)와 같다.

$$\begin{aligned} h_0 = h(0) &= \sum_{r=1}^{2N} A_r \\ h_1 = h(\Delta t) &= \sum_{r=1}^{2N} A_r e^{S_r \Delta t} \\ &\vdots \\ h_L = h(L\Delta t) &= \sum_{r=1}^{2N} A_r e^{S_r L\Delta t} \end{aligned} \tag{5}$$

식 (5)는 식 (6)과 같이 단순화 할 수 있다.

$$\begin{aligned} h_0 = h(0) &= \sum_{r=1}^{2N} A_r \\ h_1 = h(\Delta t) &= \sum_{r=1}^{2N} A_r V_r \\ &\vdots \\ h_L = h(L\Delta t) &= \sum_{r=1}^{2N} A_r V_r^L \end{aligned} \tag{6}$$

이때,  $V_r = e^{S_r \Delta t}$ 이다.

Impulse response function의 길이  $L+1$ 이  $4N$ 을 초과하게 되면 식 (6) 방정식의 해는 고유치 문제가 되며, 그 해는 매개변수  $V_i$ 에 포함된 복소 고유진동수가 된다.

모드 기여도  $A_i$  및 복소고유치  $V_i$ 의 값을 찾기 위해, 식 (6)의  $h_i$ 에 대응하는 자기회기계수  $\gamma_i$ 를  $i=0$ 부터  $i=L$ 까지 곱하고 모든 식을 다 더하면 식 (7)과 같으며, 식 (7)의 순서를 정리하면 식 (8)과 같다.

$$\sum_{j=0}^L \gamma_j h_j = \sum_{j=0}^L \gamma_j \left( \sum_{r=1}^{2N} A_r V_r^j \right) \tag{7}$$

$$\sum_{j=0}^L \gamma_j \left( \sum_{r=1}^{2N} A_r V_r^j \right) = \sum_{r=1}^{2N} A_r \left( \sum_{j=0}^L \gamma_j V_r^j \right) \tag{8}$$

Underdamped 시스템에서는  $V_r$ 과 관련된 다항식은 식 (9)와 같이 성립한다<sup>(11)</sup>.

$$\gamma_0 + \gamma_1 V_r + \dots + \gamma_L V_r^L = 0 \tag{9}$$

식 (7)~식 (9)를 통해 식 (10)이 성립한다.

$$\sum_{j=0}^L \gamma_j h_j = 0 \tag{10}$$

Impulse response function의 길이  $L$ 을  $2N$ 으로 설

정하면,  $\gamma_{2N} = 1$  일 때 식 (11)이 성립한다.

$$\begin{bmatrix} h_0 & h_1 & \cdots & h_{2N-1} \\ h_1 & h_2 & \cdots & h_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{2N-1} & h_{2N} & \cdots & h_{4N-2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \gamma_0 \\ \gamma_1 \\ \vdots \\ \gamma_{2N-1} \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} h_{2N} \\ h_{2N+1} \\ \vdots \\ h_{4N-1} \end{Bmatrix} \quad (11)$$

식 (11)에서 역행렬을 취해 계수  $\gamma_0 \cdots \gamma_{2N-1}$ 을 계산할 수 있고, 이를 식 (9)에 대입하여 다항식의 해를 구하면  $V_1 \cdots V_{2N}$ 을 계산할 수 있다. 계산된 해를 식 (6)에 대입하면 식 (12)처럼 미지수인 모드 기여도  $A_1 \cdots A_{2N}$ 을 계산할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_{2N} \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ V_1 & V_2 & \cdots & V_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ V_1^{2N-1} & V_2^{2N-1} & \cdots & V_{2N}^{2N-1} \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} h_0 \\ h_1 \\ \vdots \\ h_{2N-1} \end{Bmatrix} \quad (12)$$

추정된 모드별 감쇠값을 이용해 Rayleigh 감쇠 계수를 추정할 수 있으며, Rayleigh 감쇠 계수 중 질량 매트릭스의 계수인  $\alpha$ , 강성 매트릭스의 계수인  $\beta$  값과 주파수별 감쇠의 관계는 식 (13)과 같다.

$$\zeta(\omega) = \frac{\alpha}{2\omega} + 2\beta\omega \quad (13)$$

### 3. 감쇠 계수 추정 과정 및 결과

#### 3.1 대상 시스템

이 논문에서는 선체에 배치된 마운트 위의 대형 원형 구조물의 일부에 부착되는 부분품에 대해 분석하였다.

보안상의 이유로 대상 장비 제원 및 치구 정보는 무차원화 된 자료로 Table 1에 나타내었으며, 시스템 구성은 Fig. 1의 개략도로 대체하였다.

수중폭발이 발생했을 때 충격 입력이 선체에서 대형 구조물로 들어오게 되고, 대형 구조물 및 마운트의 특성으로 변형된 충격입력이 대상 장비인 부분품으로 인가된다. 충격 신호 측정 위치는 충격 시험에서 부분품으로 인가되는 SRS가 기준을 충족하는 지 확인하기 위해 부분품과 대형 구조물이 결합되는 지점으로 선정하였다. 국내 충격시험장에서는 30 t 이상의 시험체에 대해 충격시험을 할 수 있는 곳이 없으므로, 부분품으로 인가되는 충격하중 SRS를 모사할 수 있는 인터페이스 치구를 만들고 그 위에 대상 장비를 결합하는 방법으로 충격시험을 수행했다.

#### 3.2 데이터 획득 과정

감쇠 계수 계산을 위한 충격 가속도를 측정하기 위해 국방과학연구소 해미 충격시험장에서 시험을 수행하였다. 고중량 수평형 충격시험기(HHSM) 및 중간중량 수직형 충격시험기(MVSM)에 인터페이스 치구 및 대상 장비를 설치하고 충격 시험을 수행했다. Fig. 2 및 Fig. 3은 수평 및 수직 충격 시험 시 인터페이스 치구와 대상 장비가 시험기에 설치된 사진을 나타내었다.

충격 신호 측정을 위한 자료 획득 장비로 DEWE-2601-TR를, 가속도 센서는 저주파신호를 충분히 획득할 수 있도록 Endevco사의 2262B-1000를 사용하였으며 샘플링 주파수는 20 000 Hz로 설정하였다. 가속도계 부착 위치는 인터페이스 치구에서 부분품과 연결되는 부분에 부착하여 충격하중 SRS를 비교하였다.

#### 3.3 모달 특성치 계산 결과

충격시험을 통해 얻은 가속도 신호와 식 (9), 식 (11) 및 식 (12)를 이용하여 모드별 고유치 및 기여도를 계산하였다. 주요 모드 성분 및 감쇠에 영향을 미치는 주파수가 500 Hz 이내이므로, 측정된 신호를 3 Hz ~

**Table 1** Dimensionless equipment specifications and fixture information

Material	Stainless Steel SUS304		
Target equipment / Large structures			
Mass ratio	1/250	Stiffness ratio	10
Target equipment / Horizontal test fixture			
Mass ratio	1/13.5	Stiffness ratio	0.43
Target equipment / Vertical test fixture			
Mass ratio	1/3.5	Stiffness ratio	2.83

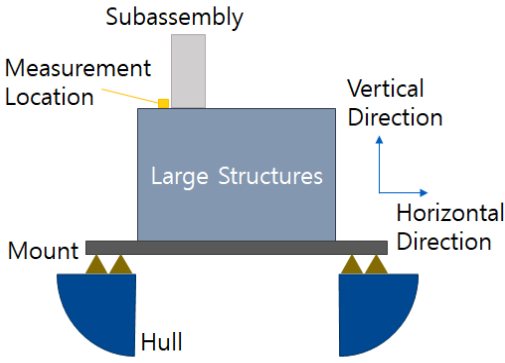


Fig. 1 Schematic diagram of the system to be analyzed

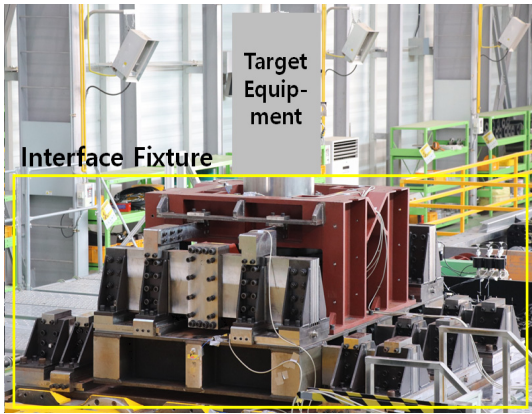


Fig. 2 Configuration of longitudinal shock test

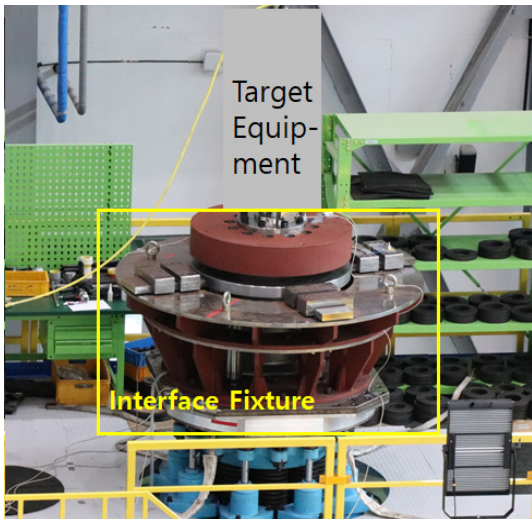


Fig. 3 Configuration of vertical shock test

500 Hz로 band-pass 필터링 후 1000 Hz로 다운샘플링하고 복소지수법을 통해 고유치 및 기여도를 계산하였다. 추정에 사용한 데이터는 1초에 해당하는 1000개를, 모드 수는 총 150개를 추정하였다.

여러 번의 충격 시험 중 수평 충격시험을 통해 계산된 모드별 기여도를 Fig. 4에 나타내었고, 계산된 기여도 및 고유치와 식 (1)을 이용해 재현하였을 때 원 충격 가속도를 재현하는 지 확인한 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

모달 특성을 통해 재현한 가속도의 경우 사용 모드 수와 샘플링 시간의 곱에 해당하는 0.15초까지는 원 신호를 잘 모사하는 것을 확인할 수 있으며, 그 이후에는 모드 수가 충분하지 않아 원 신호의 추세만 추종하는 것을 확인할 수 있다.

수직 방향에 대해서도 동일하게 모달 특성 계산 및 신호 재현 여부를 확인하였으며, 그 결과를 각각 Fig. 6 및 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7의 시간신호 재현 결과는 수평시험 결과와 유사한 특성을 나타내지만, 저주파 신호가 보다 오래 지속되는 것을 확인할 수 있다. 이는 수직 시험용 인터페이스 치구는 비교적 단순한 형상인 반면, 수평 시험용 인터페이스 치구가 더 무겁고 마찰이 많이 작용했기 때문으로 추정된다.

여기서 나타낸 Fig. 5 및 Fig. 7의 결과 외에도 4번의 수직 시험 및 5번의 수평 시험결과 또한 Fig. 5 및 Fig. 7과 유사한 결과가 나타나는 것을 확인하였다.

### 3.4 감쇠 계수 획득 결과

앞 절에서 모드 별로 계산된 감쇠 계수를 이용해 식 (13)의 추세를 따르는 Rayleigh 감쇠 계수를 시험별로 계산하였다. 추세선 계산에 있어 추정된 모드 기여도 최댓값보다 1/100 이하의 모드 기여도를 가지는 모드는 실질적인 영향이 없는 모드로 판단하여 감쇠 계수 추정에서 제외하였다. 또한, 0.5 이상의 감쇠 계수를 가지는 모드는 비현실적으로 판단하여 제외하였다.

Fig. 8은 수평방향 충격 시험으로 추정된 고유진동수와 감쇠 계수를 log-log 그래프로 나타내었다. 일부 모드의 감쇠값이 추세선에서 벗어나지만, 대부분의 값이 추세선 주위에 형성되는 것을 확인할 수 있다. 참고문헌에서는 추세선을 벗어나는 모드들을 제외하고 추세선을 반복해서 다시 그리지만<sup>(8)</sup>, 해당 내용에 대한 근거를 찾기 어려웠고 추세선에서 벗어난 감쇠값을 가지는 모드의 기여도가 높아 이 논문에서는 추

정된 감쇠 계수를 그대로 사용하였다.

수직-수평시험 회차에 따라 감쇠 계수를 추정된 결과를 Table 2에 나타내었다. 두 계수 중 베타값은 시험 종류 및 회차에 관계없이 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 반면 알파값은 수직 시험에 비해 수평 시험의 값이 더 크게 나타났는데, 이는 앞서 시간 신호에서 살펴본 바와 같이 저주파 감쇠에 영향을 주는 요소에서 차이가 발생한 것으로 판단된다.

기기 충격 시험으로 추정된 감쇠 계수는 선체 수중 폭발 시험을 통해 추정된 감쇠 계수와 비교했을 때 알파 계수는 50 % 가량 낮게, 베타 계수는 3배 가량 높게 나타났는데<sup>(8)</sup>, 알파 계수의 경우 수직-수평 시험

관계 간의 차이 및 선체의 질량을 고려했을 때 질량이 클수록 시스템 고유진동수가 전체적으로 낮아져 알파 계수가 높게 나타나는 것으로 추정하며, 베타 계수가 이 연구에서 더 크게 나오는 이유로는 강성이 클수록 시스템 고유진동수가 전체적으로 커져 100 Hz 이상의 주파수 대역에서 추정 대상 모드 수가 많아지기 때문이 있고, 참고문헌과 다르게 이 연구에서는 리셉턴스 대신 이너턴스를 사용하여 100 Hz 이상의 주파수 대역에서 계수 추정에 사용되는 모드 수가 많아지기 때문으로 판단된다. 이 연구에서 리셉턴스 대신 이너턴스를 사용한 이유는 리셉턴스를 사용하면 100 Hz 이상의 주파수 대역에서 유효한 기여도를 가지는 모드

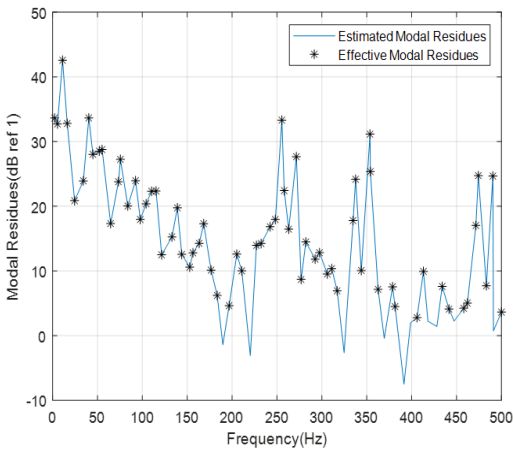


Fig. 4 Modal residues in horizontal shock test

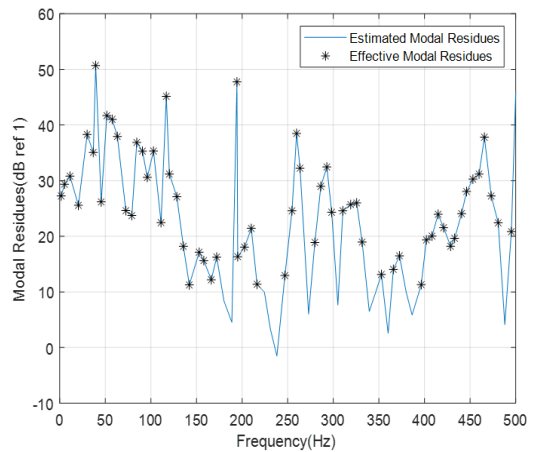


Fig. 6 Modal residues in vertical shock test

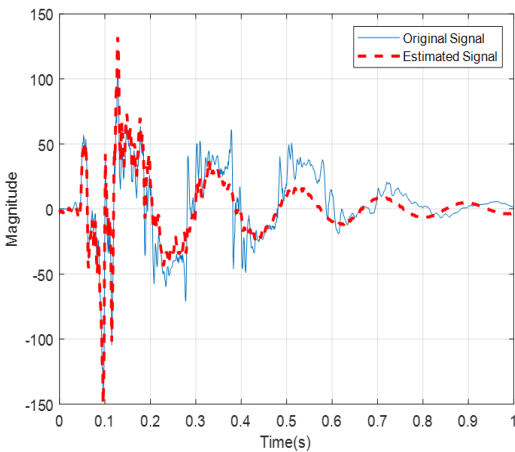


Fig. 5 The original signal and the signal reproduced with modal characteristics (horizontal)

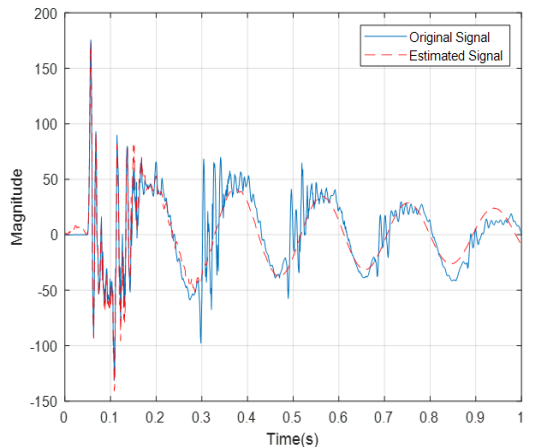
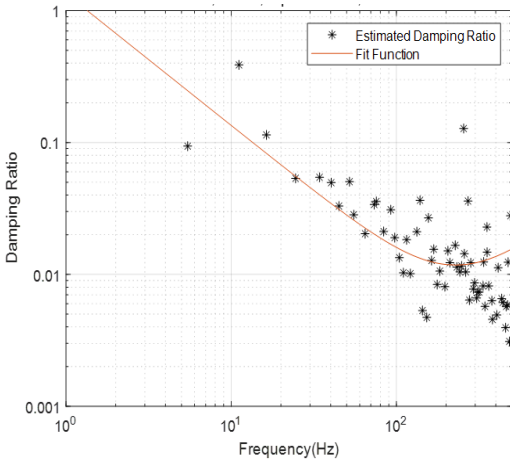


Fig. 7 The original signal and the signal reproduced with modal characteristics (vertical)



**Fig. 8** Calculation results of damping coefficient and trend line by mode

**Table 2** Estimation results of the damping coefficient

	Test round	$\alpha$	$\beta$
Vertical test	1	11.31	1.86E-05
	2	12.26	1.93E-05
	3	11.62	1.27E-05
	4	12.59	1.12E-05
	Average	11.95	1.55E-5
Horizontal test	1	18.45	2.36E-05
	2	16.91	8.22E-06
	3	18.27	7.67E-06
	4	16.25	1.33E-05
	5	15.64	8.05E-06
	Average	17.10	1.22E-5

수가 너무 적어져 유효한 추세선을 그리기 어렵기 때문으로, 이는 시스템 크기가 다르기 때문에 발생하는 차이로 판단된다.

#### 4. 결 론

대형 구조물을 해석하는데 있어 해석 효율을 향상시키기 위해 일부 장비를 부분품으로 나누어 해석을 진행했다. 그 과정에서 전달되는 충격 하중을 시간 영역으로 해석하는 중에 응답이 증폭되는 문

제가 발생했다. 이 문제를 해결하기 위한 방법 중 하나로 감쇠 계수를 적용하는 방안을 검토하였고, 이를 위해 적절한 감쇠 계수를 추정하는 방법에 대해 연구하였다.

대상 기기의 충격 하중을 인터페이스 치구를 통해 모사하여 충격시험을 수행한 뒤 데이터를 획득하였고, 복소지수법을 이용해 충격 신호의 모달 파라미터를 계산한 뒤 이를 바탕으로 Rayleigh 감쇠 계수를 도출하였다.

도출한 결과는 알파 계수의 경우 선체 수중폭발 시험을 통해 추정된 값보다 조금 낮게, 베타 계수는 조금 높게 나타났는데 이는 두 시스템 간의 특성 차이 및 모드 기여도 계산 방법에 있어 FRF를 선정하는 방법에 따른 차이로 판단된다.

이 논문에서는 이너턴스를 이용하여 Rayleigh 감쇠 계수를 추정하였는데, 리셉턴스, 모빌리티, 이너턴스 중 어떤 것이 적절한지, 무시할만한 모드 기여도 크기는 어느 정도가 적절한지 등의 요소에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다.

대형 구조물에서 전달되는 부분품 장비에 대한 분석이므로, 일반적인 구조물의 충격해석에 대해 감쇠를 적용하는 방안은 추가적인 검토가 더 필요할 것으로 판단된다.

#### References

- (1) Federal Office of Bundeswehr Equipment, Information Technology and In-service Support, 1985, Building Specification for Ships of the Federal Armed Forces (BV043), Federal Office of Bundeswehr Equipment, Information Technology and In-service Support, Koblenz, Germany.
- (2) Bae, S., Hong, C., Jeong, W. B., Park, Y. and Bin, J., 2010, Shock Resistance Analysis of a Propulsion Motor for Naval Vessels, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 20, No. 12, pp. 1183~1189.
- (3) Jang, J., Lee, C. and Jeon, K., 2021, A Study on the Impact Resistance of Equipment with Underwater Vehicle, Proceedings of the KSME Annual Spring Conference, pp. 1475~1478.
- (4) Kim, H. and Jeong, J., 2022, Shock-resistance Responses of Frigate Equipments by Underwater

Explosion, Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 36, No. 3, pp. 161~167.

(5) An, C. W., Shul, C. W., Cho, Y. S. and Kweon, J. I., 2019, Current Status and Future Directions of Shock Resistance Technology for Naval Vessels, Bulletin of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 56, No. 3, pp. 20~28.

(6) Kim, J. B., Park, Y. K., Park, M. S., Lee, J. H. and An, S. C., 2017, Evaluation of the Shock Resistance of a Gas Turbine Package, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol. 41, No. 10, pp. 1005~1009.

(7) Jeon, S., Han, H., Lee, K. and Park, S., 2016, A Prediction of the Shock Resistant Performance of a Shipboard Equipment Considering Supports on the Hull Bottom, Proceedings of the KSNVE Annual Spring

Conference, pp. 169~170.

(8) An, C. W., Kim, D. K., Park, B. W. and Ham, I. B., 2004, A Ship Shock Analysis Method with Surface Cut-off and Applications, Proceeding of the 75th Shock and Vibration Symposium, VA, United States.

(9) Shin, Y. S. and Ham, I. B., 2003, Damping Modeling Strategy for Naval Ship System, Proceedings of 74th Shock and Vibration Symposium, VA, United States.

(10) Guo, J., Huang, S., Nikolay, T. and Li, M., 2018, Vibration Damping of Naval Ships Based on Ship Shock Trials, Applied Acoustics, Vol. 133, pp. 52~57.

(11) Maia, N. M. M. and e Silva, J. M. M. 1997, Theoretical and Experimental Modal Analysis, 2nd Edition, Research Studies Press, Taunton, United Kingdom, pp. 1~468.